

บทที่ 4

ผลการทดลอง

การทดลองการรีไซเคิลอีพ็อกซีเรซินในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิด FR-4 ด้วยตัวทำละลายร้อน เป็นการศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการรีไซเคิลของตัวทำละลายแต่ละชนิด เพื่อเลือกใช้ตัวทำละลายที่มีประสิทธิภาพของการรีไซเคิลสูงสุด ในการทดลองนี้เลือกใช้ตัวทำละลายทั้งหมด 5 ชนิด ได้แก่ เฮกเซน เมทิลลีนคลอไรด์ เอทิลอะซิเตท อะซีโตน และเมทานอล เมื่อได้ตัวทำละลายที่มีประสิทธิภาพสูงสุด จึงทำการศึกษาปัจจัยและสภาวะที่มีผลต่อการรีไซเคิล ในการทดลองนี้เป็นการศึกษาขนาดอนุภาคของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการรีไซเคิล โดยเลือกใช้แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์บดหยาบ ขนาดอนุภาค 3–4 มิลลิเมตร และแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์บดละเอียด ขนาดอนุภาค 0.075-0.097 มิลลิเมตร และศึกษาเวลาในการรีไซเคิลที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการรีไซเคิล โดยเลือกใช้ช่วงเวลาทั้งหมด 4 ช่วง ได้แก่ 4 ชั่วโมง 6 ชั่วโมง 12 ชั่วโมง และ 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นจึงทำการศึกษาและพัฒนาเทคนิคที่ใช้ในการรีไซเคิล เพื่อเลือกใช้และเพิ่มประสิทธิภาพของเทคนิคในการรีไซเคิล ในการทดลองนี้ใช้เทคนิคในการรีไซเคิลทั้งหมด 4 เทคนิค ได้แก่ เทคนิครีฟลักซ์ เทคนิคชอกเลต เทคนิคผสมระหว่างเทคนิครีฟลักซ์กับเทคนิคชอกเลต และเทคนิคดึงความดัน และทำการทดสอบหามูฟกิ้งชันหลักของรีไซเคิลเรซินด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี

จากการศึกษาตัวทำละลาย ปัจจัย สภาวะ และเทคนิคในการรีไซเคิล เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพของการรีไซเคิลสูงสุด รีไซเคิลเรซินที่ได้จะนำมาผสมกับอีพ็อกซีเรซินใหม่ เพื่อเปรียบเทียบกับแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ผสมกับอีพ็อกซีเรซินใหม่ โดยเลือกใช้แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ขนาด 60-80 mesh 80-160 mesh และ 160-200 mesh ในอัตราส่วนผสมร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก เมื่อทำการผสมและขึ้นรูปชิ้นงานเพื่อเตรียมทดสอบ จะทำการเปรียบเทียบความแข็ง ความต้านทานแรงกระแทก ความต้านทานแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยึดติด มอดูลัส ลักษณะฐานานวิทยา อุณหภูมิคล้ายแก้ว และอุณหภูมิการสลายตัว

4.1 ประสิทธิภาพของตัวทำละลายในการรีไซเคิลอีพ็อกซีเรซินในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

การทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพของตัวทำละลายแต่ละชนิด สำหรับการรีไซเคิลอีพ็อกซีเรซินในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยตัวทำละลายทั้งหมด 5 ชนิด ได้แก่ เฮกเซน เมทิลลีนคลอไรด์ เอทิลอะซีเตท อะซีโตน และเมทานอล รีไซเคิลด้วยเทคนิครีฟลักซ์ ตัวทำละลาย 200 มิลลิลิตร แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ขนาดอนุภาค 0.075-0.097 มิลลิเมตร 20 กรัม อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เวลา 24 ชั่วโมง ร้อยละผลิตภัณฑ์คำนวณได้จากสมการที่ (4-1)

$$\text{ร้อยละผลิตภัณฑ์} = \frac{\text{น้ำหนักของรีไซเคิลเรซิน}}{\text{น้ำหนักของอีพ็อกซีเรซินในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์}} \times 100$$

(4-1)

ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 ร้อยละผลิตภัณฑ์จากการรีไซเคิลอีพ็อกซีเรซินในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยตัวทำละลาย 5 ชนิด

ตัวทำละลาย	ร้อยละผลิตภัณฑ์
เฮกเซน	2.33 ± 0.17
เมทิลลีนคลอไรด์	23.52 ± 1.23
เอทิลอะซีเตท	25.18 ± 0.66
อะซีโตน	21.94 ± 0.57
เมทานอล	16.35 ± 0.95

จากผลการทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพของตัวทำละลายแต่ละชนิด สำหรับการรีไซเคิลอีพ็อกซีเรซินในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยตัวทำละลาย 5 ชนิด ได้แก่ เฮกเซน เมทิลลีนคลอไรด์ เอทิลอะซีเตท อะซีโตน และเมทานอล ดังแสดงในตารางที่ 4-1 พบว่า ตัวทำละลายเอทิลอะซีเตท มีประสิทธิภาพของการรีไซเคิลอีพ็อกซีเรซินในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์สูงสุด คือ 25.18 เปอร์เซ็นต์ ประสิทธิภาพรองลงมา คือ เมทิลลีนคลอไรด์ 23.52 เปอร์เซ็นต์ อะซีโตน 21.94 เปอร์เซ็นต์ เมทานอล 16.35 เปอร์เซ็นต์ และเฮกเซน 2.33 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ รีไซเคิลเรซินที่ได้

จากการรีไซเคิลด้วยตัวทำละลายเอทิลอะซีเตท ได้ร้อยละผลิตภัณฑ์สูงสุด คือ 25.18 เปอร์เซนต์ เนื่องจากการรีไซเคิลอีพ็อกซีเรซินในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์เกิดจากการสลายพันธะด้วยอุณหภูมิ [16] ตัวทำละลายเอทิลอะซีเตทมีอุณหภูมิจุดเดือดสูงสุด ดังแสดงในตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4-2 อุณหภูมิจุดเดือดของตัวทำละลาย [38]

ตัวทำละลาย	จุดเดือด (องศาเซลเซียส)
เฮกเซน	68.9
เมทิลลีนคลอไรด์	61.7
เอทิลอะซีเตท	77.1
อะซีโตน	56.2
เมทานอล	65.0

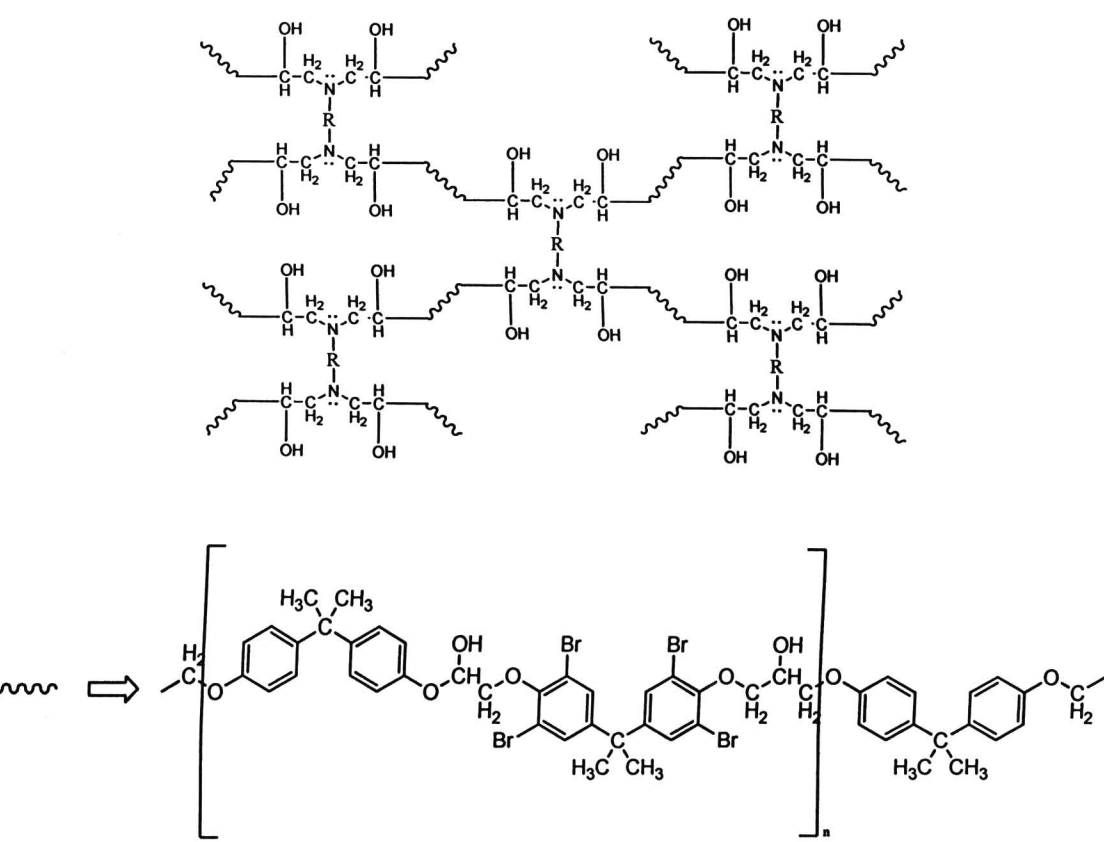
4.2 ผลของขนาดอนุภาคที่มีผลต่อการรีไซเคิลอีพ็อกซีเรซินในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

การทดลองผลของขนาดอนุภาคแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่มีผลต่อการรีไซเคิลอีพ็อกซีเรซินในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ โดยใช้แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์บดหยาบ ขนาดอนุภาค 3–4 มิลลิเมตร และแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์บดละเอียด ขนาดอนุภาค 0.075-0.097 มิลลิเมตร รีไซเคิลด้วยเทคนิค รีฟลักซ์ ตัวทำละลายเอทิลอะซีเตท 200 มิลลิลิตร แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ 20 กรัม อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เวลา 24 ชั่วโมง ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4-3

ตารางที่ 4-3 ร้อยละผลิตภัณฑ์จากการรีไซเคิลอีพ็อกซีเรซินในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์บดหยาบ และบดละเอียด

ขนาดอนุภาคของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (มิลลิเมตร)	ร้อยละผลิตภัณฑ์
3-4	20.20 ± 0.70
0.075-0.097	25.18 ± 0.66

จากผลการทดลองผลของขนาดอนุภาคผงวงจรีเล็กทรอนิกส์ที่มีผลต่อการรีไซเคิลอีพ็อกซีเรซินในผงวงจรีเล็กทรอนิกส์ โดยใช้ผงวงจรีเล็กทรอนิกส์บดหยาบ ขนาดอนุภาค 3–4 มิลลิเมตร และผงวงจรีเล็กทรอนิกส์บดละเอียด ขนาดอนุภาค 0.075-0.097 มิลลิเมตร ดังแสดงในตารางที่ 4-3 พบว่า ผงวงจรีเล็กทรอนิกส์ขนาดอนุภาค 0.075-0.097 มิลลิเมตร มีประสิทธิภาพของการรีไซเคิลอีพ็อกซีเรซินในผงวงจรีเล็กทรอนิกส์สูงสุด คือ 25.18 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจาก โครงสร้างของอีพ็อกซีเรซินเมื่อเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางเป็น โครงร่างตาข่ายสามมิติ จะมีความหนาแน่นและความแข็งแรงสูง ดังแสดงในภาพที่ 4-1



ภาพที่ 4-1 โครงสร้างของอีพ็อกซีเรซินในผงวงจรีเล็กทรอนิกส์ที่เกิดพันธะเชื่อมขวาง

การรีไซเคิลด้วยตัวทำละลายจึงเริ่มเกิดขึ้นที่พื้นที่ผิวภายนอก ผงวงจรีเล็กทรอนิกส์ขนาดอนุภาค 0.075-0.097 มิลลิเมตร มีพื้นที่ผิวที่สัมผัสกับตัวทำละลายมากกว่าผงวงจรีเล็กทรอนิกส์ขนาดอนุภาค 3–4 มิลลิเมตร ประสิทธิภาพของการรีไซเคิลของผงวงจรีเล็กทรอนิกส์ขนาดอนุภาค 0.075-0.097 มิลลิเมตร จึงสูงกว่าผงวงจรีเล็กทรอนิกส์ขนาดอนุภาค 3–4 มิลลิเมตร

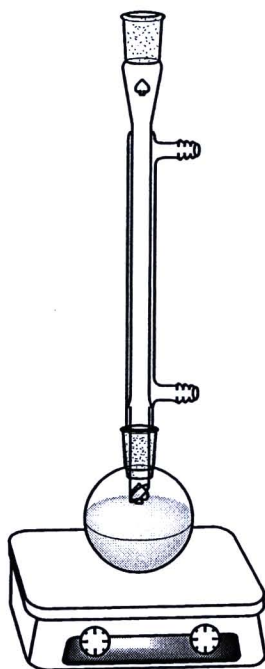
4.3 เวลาที่ใช้ในการรีไซเคิลอีพ็อกซีเรซินในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

การทดลองเวลาที่ใช้ในการรีไซเคิลอีพ็อกซีเรซินในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ โดยใช้เวลาในการรีไซเคิล 4 ชั่วโมง 6 ชั่วโมง 12 ชั่วโมง และ 24 ชั่วโมง รีไซเคิลด้วยเทคนิครีฟลักซ์ ตัวทำละลายเอทิลอะซิเตท 200 มิลลิลิตร แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ขนาดอนุภาค 0.075-0.097 มิลลิเมตร 20 กรัม อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4-4

ตารางที่ 4-4 ร้อยละผลิตภัณฑ์จากการรีไซเคิลอีพ็อกซีเรซินในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้เวลาในการรีไซเคิลต่าง ๆ

เวลาที่ใช้ในการรีไซเคิล (ชั่วโมง)	ร้อยละผลิตภัณฑ์
4	9.98 ± 0.35
6	25.15 ± 0.65
12	25.87 ± 0.82
24	25.18 ± 0.66

จากผลการทดลองเวลาที่ใช้ในการรีไซเคิลอีพ็อกซีเรซินในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ โดยใช้เวลาในการรีไซเคิล 4 ชั่วโมง 6 ชั่วโมง 12 ชั่วโมง และ 24 ชั่วโมง ดังแสดงในตารางที่ 4-4 พบว่าเวลาในการรีไซเคิล 6 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพของการรีไซเคิลอีพ็อกซีเรซินในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์เหมาะสมที่สุด คือ 25.15 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจาก รูปแบบของการรีไซเคิลด้วยเทคนิครีฟลักซ์เป็นการเติมแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์และตัวทำละลายลงในขวดก้นกลมใบเดียวกันแล้วให้ความร้อน ดังแสดงในภาพที่ 4-2



ภาพที่ 4-2 ชุดทดลองรีฟลักซ์

เมื่อเวลาในการรีไซเคิลเพิ่มขึ้น ตัวทำละลายจะมีปริมาณของอีพ็อกซีเรซินที่ละลายอยู่ภายใน ตัวทำละลายเพิ่มมากขึ้น เมื่อรีไซเคิลครบ 6 ชั่วโมง สารละลายก็จะอิ่มตัว ดังนั้นเมื่อเพิ่มเวลาในการ รีไซเคิลจาก 6 ชั่วโมง เป็น 12 ชั่วโมง และ 24 ชั่วโมง ร้อยละผลิตภัณฑ์จึงไม่เพิ่มขึ้น

4.4 การเพิ่มประสิทธิภาพของการรีไซเคิลอีพ็อกซีเรซินในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

การทดลองการเพิ่มประสิทธิภาพของการรีไซเคิลอีพ็อกซีเรซินในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ โดยใช้เทคนิคในการรีไซเคิลทั้งหมด 4 เทคนิค ได้แก่ เทคนิครีฟลักซ์ เทคนิคชอกเกต เทคนิคชอกเกตกับชุดให้ความร้อน และเทคนิคดึงความดัน ความดัน 15 บาร์ ใช้ตัวทำละลายเอทิลอะซีเตท 200 มิลลิลิตร แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ขนาดอนุภาค 0.075-0.097 มิลลิเมตร 20 กรัม อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เวลา 6 ชั่วโมง ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4-5

ตารางที่ 4-5 ร้อยละผลิตภัณฑ์การรีไซเคิลอีพ็อกซีเรซินในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทั้ง 4 เทคนิค

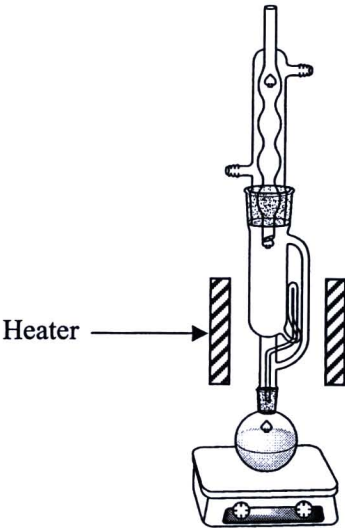
เทคนิคการรีไซเคิล	ร้อยละผลิตภัณฑ์
รีฟลักซ์	25.15 ± 0.65
ชอกเลต	29.20 ± 0.55
เทคนิคชอกเลตกับชุดให้ความร้อน	38.01 ± 0.34
ถึงความดัน	50.46 ± 0.69

จากผลการทดลองการเพิ่มประสิทธิภาพของการรีไซเคิลอีพ็อกซีเรซินในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ โดยใช้เทคนิคในการรีไซเคิลทั้งหมด 4 เทคนิค ได้แก่ เทคนิครีฟลักซ์ เทคนิคชอกเลต เทคนิคชอกเลตกับชุดให้ความร้อนและเทคนิคถึงความดัน ความดัน 15 บาร์ ดังแสดงในตารางที่ 4-5 พบว่า เทคนิคถึงความดันมีประสิทธิภาพของการรีไซเคิลอีพ็อกซีเรซินในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์สูงสุด คือ 50.46 เปอร์เซ็นต์ รองลงมา คือ เทคนิคชอกเลตกับชุดให้ความร้อน 38.01 เปอร์เซ็นต์ เทคนิคชอกเลต 29.20 เปอร์เซ็นต์ และเทคนิครีฟลักซ์ 25.15 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

เทคนิครีฟลักซ์มีประสิทธิภาพของการรีไซเคิลต่ำที่สุด เนื่องจาก เทคนิครีฟลักซ์เป็นการเติมแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์และตัวทำละลายลงในขวดก้นกลมใบเดียวกันแล้วให้ความร้อน เมื่อตัวทำละลายมีปริมาณของอีพ็อกซีเรซินที่ละลายอยู่ในตัวทำละลายจนถึงจุดอิ่มตัว ตัวทำละลายก็ไม่สามารถรีไซเคิลอีพ็อกซีเรซินในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ได้อีก

เทคนิคชอกเลตมีประสิทธิภาพของการรีไซเคิลสูงกว่าเทคนิครีฟลักซ์ เนื่องจาก เทคนิคชอกเลตจะเติมแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในกระดาศทิมเบิล (Soxhlet Thimble) ที่อยู่ในแชมเบอร์ (Soxhlet Chamber) เติมตัวทำละลายในขวดก้นกลมด้านล่าง ดังแสดงในภาพที่ 2-14 ทำให้ตัวทำละลายในแชมเบอร์เปรียบเสมือนเป็นตัวทำละลายใหม่

เทคนิคชอกเลตกับชุดให้ความร้อนมีประสิทธิภาพของการรีไซเคิลสูงกว่าเทคนิครีฟลักซ์และเทคนิคชอกเลต เนื่องจาก เทคนิคชอกเลตกับชุดให้ความร้อนจะใช้ชุดทดลองชอกเลตและมีการให้ความร้อนที่แชมเบอร์ของชุดทดลองชอกเลต ดังแสดงในภาพที่ 4-3



ภาพที่ 4-3 ชุดทดลองผสมระหว่างรีฟลักซ์กับชอกเลต

เปรียบเสมือนว่าเคมีเบอร์ของชุดทดลองชอกเลตเป็นชุดทดลองรีฟลักซ์ เมื่อตัวทำละลายมีอุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพของการรีไซเคิลเพิ่มขึ้น

เทคนิคถึงความดันมีประสิทธิภาพของการรีไซเคิลที่พอกซีเรซินในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์สูงสุด เนื่องจาก การรีไซเคิลด้วยชุดทดลองถึงความดันจะเกิดความดันขึ้นภายในถึงความดัน ตามความสัมพันธ์ของความดันกับอุณหภูมิ จากกฎของแก๊สสมบูรณ์ (Ideal Gas Law) ดังแสดงในสมการที่ (4-2)

PV=nRT

(4-2)

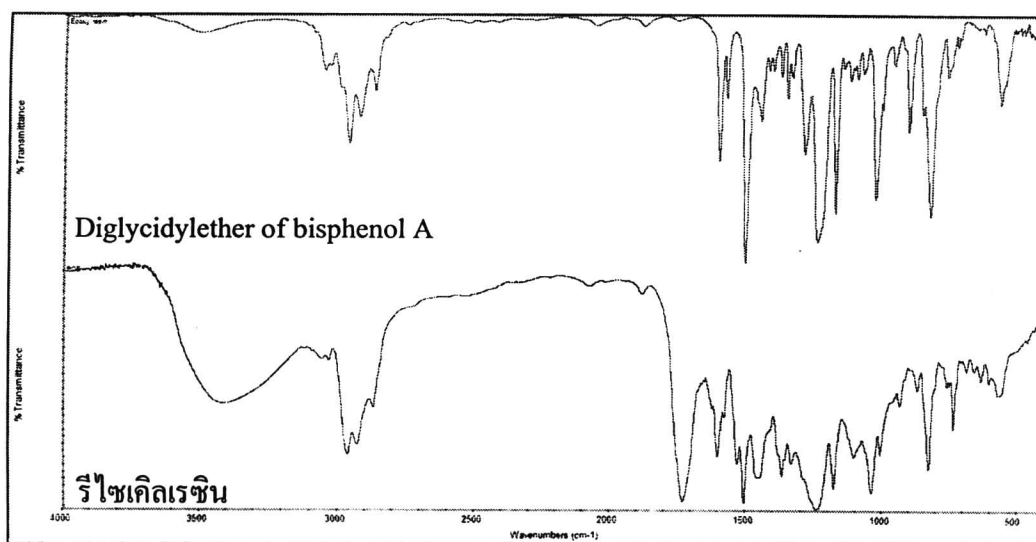
เมื่อ

- P = ความดัน (Pascals)
- V = ปริมาตร (m³)
- n = จำนวนโมล
- R = ค่าคงที่ของแก๊ส (8.314472 J·K⁻¹·mol⁻¹)
- T = อุณหภูมิ (Kelvin)

เมื่อความดันเพิ่มขึ้นทำให้อุณหภูมิจุดเดือดของตัวทำละลายสูงขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิของตัวทำละลายในถังความดันสูงกว่าอุณหภูมิของตัวทำละลายปกติ ทำให้ประสิทธิภาพของการรีไซเคิลเพิ่มขึ้น

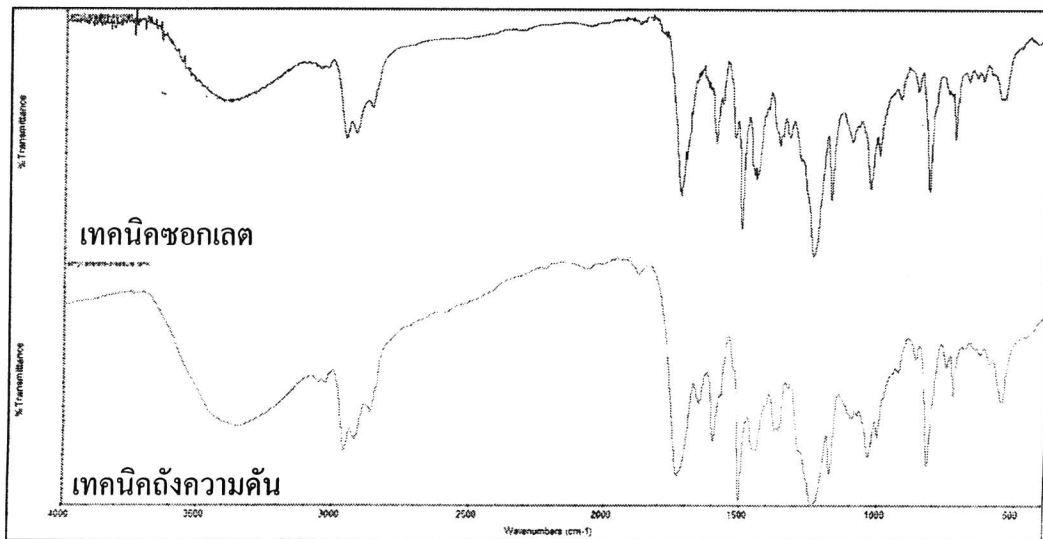
4.5 การศึกษาหุ้ฟ้งักชันหลักด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี

การศึกษาหุ้ฟ้งักชันหลักด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี รีไซเคิลอีพ็อกซีเรซินในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยเทคนิครีฟลักซ์ ตัวทำละลายเอทิลอะซีเตท 200 มิลลิลิตร แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ขนาดอนุภาค 0.075-0.097 มิลลิเมตร 20 กรัม อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เวลา 6 ชั่วโมง ใช้รีไซเคิลเรซินในการทดสอบ 0.01 มิลลิลิตร บน KBr Cell ผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 4-4 และ 4-5



ภาพที่ 4-4 FTIR spectra ของ Diglycidylether of Bisphenol A และรีไซเคิลเรซินด้วยเทคนิค

ชอกเลต



ภาพที่ 4-5 FTIR spectra ของรีไซเคิลเรซินจากเทคนิคชอกเลตและเทคนิคถังความดัน

จากผลการศึกษาและเปรียบเทียบหมู่ฟังก์ชันหลักของรีไซเคิลเรซินและรีไซเคิลเรซินจากเทคนิคชอกเลตกับเทคนิคถังความดันด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปคโตรสโคปี ดังแสดงในภาพที่ 4-4 และ 4-5 พบว่า หมู่ฟังก์ชันหลักของรีไซเคิลเรซินที่ความยาวคลื่น $1480-1540\text{ cm}^{-1}$ ของหมู่ฟังก์ชันอะโรมาติก ความยาวคลื่น $1020-1040\text{ cm}^{-1}$ ของหมู่ฟังก์ชัน phenyl-O-C มีลักษณะใกล้เคียงกันกับหมู่ฟังก์ชันหลักของ Diglycidylether of Bisphenol A และเมื่อเปรียบเทียบหมู่ฟังก์ชันหลักของรีไซเคิลเรซินจากเทคนิคชอกเลตกับเทคนิคถังความดัน พบว่า หมู่ฟังก์ชันหลักของรีไซเคิลเรซินจากเทคนิคชอกเลตกับเทคนิคถังความดันมีลักษณะใกล้เคียงกัน

4.6 สมบัติเชิงกลของชิ้นงานทดสอบ

การทดสอบสมบัติเชิงกลของชิ้นงานทดสอบจากการรีไซเคิลทางเคมี คือ อีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมกับรีไซเคิลเรซินจากการรีไซเคิลด้วยเทคนิคถังความดันและชิ้นงานทดสอบจากการรีไซเคิลทางกล คือ อีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมกับผงวงจรีเล็กทรอนิกส์บด ขนาด 60-80 mesh 80-160 mesh และ 160-200 mesh ในอัตราส่วนผสมร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก เพื่อเปรียบเทียบความแข็งแรง ความต้านทานแรงกระแทก ความต้านทานแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืดดึง และมอดุลัส

4.6.1 การทดสอบความแข็ง

การทดสอบความแข็งของอีพ็อกซีเรซิน (E0) อีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมรีไซเคิลเรซิน (E1 ถึง E3) และอีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมผงวงจรีเล็กทรอนิกส์บด ขนาด 60-80 mesh (E4 ถึง E6) 80-160 mesh (E7 ถึง E9) และ 160-200 mesh (E10 ถึง E12) ในอัตราส่วนผสมร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 2240 ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4-6

ตารางที่ 4-6 ความแข็งของชิ้นงานทดสอบอีพ็อกซีเรซิน อีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมรีไซเคิลเรซินและอีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมผงวงจรีอิเล็กทรอนิกส์บด ขนาด 60-80 mesh 80-160 mesh และ 160-200 mesh ในอัตราส่วนผสมร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก

ชิ้นงานทดสอบ	ค่าความแข็ง
E0	77.88 ± 0.32
E1	76.97 ± 0.54
E2	77.00 ± 0.28
E3	76.90 ± 1.01
E4	77.18 ± 0.37
E5	78.13 ± 0.48
E6	77.65 ± 1.03
E7	77.50 ± 0.56
E8	77.90 ± 0.55
E9	77.93 ± 0.96
E10	78.03 ± 0.20
E11	78.78 ± 0.64
E12	79.00 ± 0.96

จากผลการทดสอบความแข็งของอีพ็อกซีเรซิน (E0) อีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมรีไซเคิลเรซิน (E1 ถึง E3) และอีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมผงวงจรีอิเล็กทรอนิกส์บด ขนาด 60-80 mesh (E4 ถึง E6) 80-160 mesh (E7 ถึง E9) และ 160-200 mesh (E10 ถึง E12) ในอัตราส่วนผสมร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก ดังแสดงในตารางที่ 4-6 พบว่า ชิ้นงานทดสอบ E0 ถึง E12 มีค่าความแข็งใกล้เคียง

กัน เนื่องจาก รีไซเคิลเรซินและผงวงจรีเล็กทรอนิกส์ที่ผสมกับอีพ็อกซีเรซินใหม่ มีปริมาณไม่มากพอที่จะทำให้ค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบอีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมรีไซเคิลเรซินและอีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมผงวงจรีเล็กทรอนิกส์ बदเปลี่ยนแปลง

4.6.2 การทดสอบความต้านทานแรงกระแทก

การทดสอบความต้านทานแรงกระแทกของอีพ็อกซีเรซิน (E0) อีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมรีไซเคิลเรซิน (E1 ถึง E3) และอีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมผงวงจรีเล็กทรอนิกส์ บด ขนาด 60-80 mesh (E4 ถึง E6) 80-160 mesh (E7 ถึง E9) และ 160-200 mesh (E10 ถึง E12) ในอัตราส่วนผสมร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 256 ทดสอบแรงกระแทกแบบ Izod น้ำหนักก้อน 2.75 จูล ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4-7

ตารางที่ 4-7 ความต้านทานแรงกระแทกของชิ้นงานทดสอบอีพ็อกซีเรซิน อีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมรีไซเคิลเรซินและอีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมผงวงจรีเล็กทรอนิกส์ บด ขนาด 60-80 mesh 80-160 mesh และ 160-200 mesh ในอัตราส่วนผสมร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก

ชิ้นงานทดสอบ	ความต้านทานแรงกระแทก (kJ/m ²)
E0	4.30 ± 0.18
E1	4.36 ± 0.24
E2	4.30 ± 0.15
E3	4.15 ± 0.47
E4	4.05 ± 0.14
E5	3.86 ± 0.27
E6	3.83 ± 0.09
E7	4.08 ± 0.29
E8	3.76 ± 0.18
E9	3.83 ± 0.09
E10	4.24 ± 0.28

ตารางที่ 4-7 (ต่อ)

E11	4.18 ± 0.21
E12	3.97 ± 0.12

จากผลการทดสอบความต้านทานแรงกระแทกของอีพ็อกซีเรซิน (E0) อีพ็อกซีเรซินใหม่ผสม ไรโซเคลเรซิน (E1 ถึง E3) และอีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมผงวงจรีเล็กทรอนิกส์บด ขนาด 60-80 mesh (E4 ถึง E6) 80-160 mesh (E7 ถึง E9) และ 160-200 mesh (E10 ถึง E12) ในอัตราส่วนผสมร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก ดังแสดงในตารางที่ 4-7 พบว่า ชิ้นงานทดสอบ E1 E2 และ E3 สามารถรับแรงกระแทกได้มากกว่าชิ้นงานทดสอบ E4 ถึง E12 เล็กน้อย เนื่องจาก ไรโซเคลเรซินมีลักษณะ เป็นของเหลวหนืดใกล้เคียงกับเรซินใหม่แต่ผงวงจรีอิเล็กทรอนิกส์มีลักษณะเป็นของแข็งและ อีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมไรโซเคลเรซินมีพลังงานพื้นผิวมากกว่าและผสมเป็นเนื้อเดียวกันกับอีพ็อกซีเร ซินใหม่ได้ดีกว่าอีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมผงวงจรีอิเล็กทรอนิกส์บด ส่งผลให้ความต้านทานแรง กระแทกมากกว่า

เมื่อพิจารณาชิ้นงานทดสอบอีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมไรโซเคลเรซิน (E1 ถึง E3) ดังแสดงใน ตารางที่ 4-7 พบว่า ชิ้นงานทดสอบ E1 สามารถรับแรงกระแทกได้สูงที่สุดและมีแนวโน้มลดลง เล็กน้อยเมื่อปริมาณของไรโซเคลเรซินเพิ่มขึ้น เนื่องจาก การไรโซเคลอีพ็อกซีเรซินใน ผงวงจรีอิเล็กทรอนิกส์ด้วยตัวทำละลาย อุณหภูมิ และความดัน ทำให้โมเลกุลของไรโซเคลเรซิน เกิดการเสื่อมสภาพ น้ำหนักโมเลกุลลดลงและการกระจายน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้น [12] เมื่อผสม ไรโซเคลเรซินในปริมาณมากขึ้น ส่งผลให้ความต้านทานแรงกระแทกลดลง

เมื่อพิจารณาชิ้นงานทดสอบอีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมผงวงจรีอิเล็กทรอนิกส์บด ขนาด 60-80 mesh (E4 ถึง E6) 80-160 mesh (E7 ถึง E9) และ 160-200 mesh (E10 ถึง E12) ดังแสดงใน ตารางที่ 4-7 พบว่า ชิ้นงานทดสอบ E4 E7 และ E10 มีความต้านทานแรงกระแทกสูงสุดและชิ้นงาน ทดสอบ E10 ถึง E12 มีความต้านทานแรงกระแทกมากกว่าชิ้นงานทดสอบ E4 ถึง E9 เนื่องจาก ชิ้นงานทดสอบ E4 E7 และ E10 มีปริมาณผงวงจรีอิเล็กทรอนิกส์บดน้อยที่สุดและชิ้นงานทดสอบ E10 ถึง E12 มีขนาดอนุภาคของอีพ็อกซีเรซินในผงวงจรีอิเล็กทรอนิกส์เล็กที่สุดทำให้มีพื้นที่ผิว

มากที่สุด เมื่อผสมกับอีพ็อกซีเรซินใหม่จึงเกิดการกระจายตัวและยึดเกาะได้ดีกว่าชิ้นงานทดสอบ E4 ถึง E9 ส่งผลให้ความต้านทานแรงกระแทกสูงกว่า

4.6.3 การทดสอบความต้านทานแรงดึง เปรอร์เซ็นต์การยึดติดและมอดูลัสยึดติด

การทดสอบความต้านทานแรงดึง เปรอร์เซ็นต์การยึดติดและมอดูลัสยึดติดของอีพ็อกซีเรซินใหม่ (E0) อีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมรีไซเคิลเรซิน (E1 ถึง E3) และอีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมกับผงวงจรรีไซเคิลทรอนิกสับด ขนาด 60-80 mesh (E4 ถึง E6) 80-160 mesh (E7 ถึง E9) และ 160-200 mesh (E10 ถึง E12) ในอัตราส่วนผสมร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 638 ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4-8 และภาพที่ 4-6

ตารางที่ 4-8 ความต้านทานแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยึดติดของชิ้นงานทดสอบอีพ็อกซีเรซินอีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมรีไซเคิลเรซินและอีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมผงวงจรรีไซเคิลทรอนิกสับด ขนาด 60-80 mesh 80-160 mesh และ 160-200 mesh ในอัตราส่วนผสมร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก

ชิ้นงานทดสอบ	ความต้านทานแรงดึง (MPa)	เปอร์เซ็นต์การยึดติด (เปอร์เซ็นต์)
E0	76.02 ± 1.9	5.63 ± 0.35
E1	75.15 ± 1.25	5.22 ± 0.06
E2	72.32 ± 0.58	5.20 ± 0.23
E3	64.02 ± 3.82	5.30 ± 0.54
E4	41.36 ± 3.32	2.69 ± 0.13
E5	41.13 ± 2.31	2.70 ± 0.23
E6	39.06 ± 4.02	2.68 ± 0.11
E7	53.21 ± 2.56	3.16 ± 0.11
E8	50.35 ± 2.25	3.21 ± 0.16
E9	44.67 ± 2.91	3.38 ± 0.22
E10	65.08 ± 1.77	3.57 ± 0.22

ตารางที่ 4-8 (ต่อ)

E11	61.32 ± 0.80	3.58 ± 0.24
E12	60.16 ± 1.38	3.76 ± 0.36

จากผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงของอีพ็อกซีเรซิน (E0) อีพ็อกซีเรซินใหม่ผสม ไรโซเคลเรซิน (E1 ถึง E3) และอีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมผงวงจรีเล็กทรอนิกส์บด ขนาด 60-80 mesh (E4 ถึง E6) 80-160 mesh (E7 ถึง E9) และ 160-200 mesh (E10 ถึง E12) ในอัตราส่วนผสมร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก ดังแสดงในตารางที่ 4-8 พบว่า ชิ้นงานทดสอบ E1 ถึง E3 สามารถต้านทานแรงดึงได้มากกว่าชิ้นงานทดสอบ E4 ถึง E12 เนื่องจาก ไรโซเคลเรซินมีลักษณะเป็นของเหลวหนืดใกล้เคียงกับเรซินใหม่แต่ผงวงจรีอิเล็กทรอนิกส์มีลักษณะเป็นของแข็งและอีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมไรโซเคลเรซินมีพลังงานพื้นผิวระหว่างอีพ็อกซีเรซินใหม่กับไรโซเคลเรซินมากกว่าอีพ็อกซีเรซินใหม่กับเส้นใยแก้วที่เป็นส่วนประกอบของผงวงจรีอิเล็กทรอนิกส์บด ดังนั้นอีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมไรโซเคลเรซินจึงสามารถผสมรวมเป็นเนื้อเดียวกันกับอีพ็อกซีเรซินใหม่ได้ดีกว่าผงวงจรีอิเล็กทรอนิกส์บด ส่งผลให้ความต้านทานแรงดึงมากกว่า

เมื่อพิจารณาชิ้นงานทดสอบอีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมไรโซเคลเรซิน (E1 ถึง E3) ดังแสดงในตารางที่ 4-8 พบว่า ชิ้นงานทดสอบ E1 สามารถต้านทานแรงดึงได้สูงสุดและมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณไรโซเคลเรซินเพิ่มขึ้น เนื่องจาก การไรโซเคลอีพ็อกซีเรซินในผงวงจรีอิเล็กทรอนิกส์ด้วยตัวทำละลาย อุณหภูมิ และความดัน ทำให้โมเลกุลของไรโซเคลเรซินเกิดการเสื่อมสภาพ น้ำหนักโมเลกุลลดลงและการกระจายน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้น เมื่อผสมไรโซเคลเรซินในปริมาณมากขึ้น ส่งผลให้ความต้านทานแรงดึงลดลง ซึ่งเป็นเหตุผลเดียวกับการทดสอบแรงกระแทก

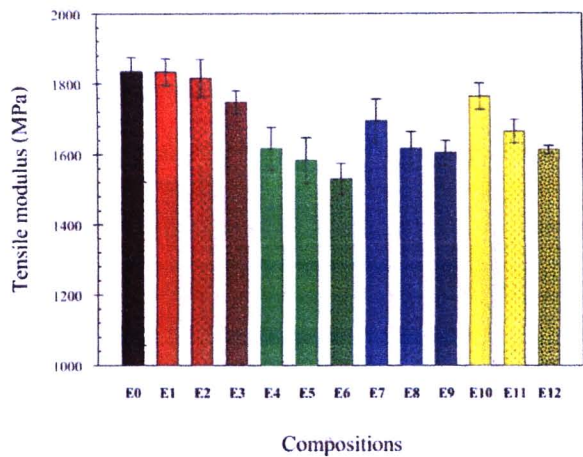
เมื่อพิจารณาชิ้นงานทดสอบอีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมผงวงจรีอิเล็กทรอนิกส์บด ขนาด 60-80 mesh (E4 ถึง E6) 80-160 mesh (E7 ถึง E9) และ 160-200 mesh (E10 ถึง E12) ดังแสดงในตารางที่ 4-8 พบว่า ชิ้นงานทดสอบ E4 E7 และ E10 มีความต้านทานแรงดึงสูงสุดและชิ้นงานทดสอบ E10 ถึง E12 มีความต้านทานแรงดึงมากกว่าชิ้นงานทดสอบ E4 ถึง E9 เนื่องจาก ชิ้นงานทดสอบ E4 E7 และ E10 มีปริมาณผงวงจรีอิเล็กทรอนิกส์บดน้อยที่สุดและชิ้นงานทดสอบ E10 ถึง E12 มีขนาดอนุภาคของอีพ็อกซีเรซินในผงวงจรีอิเล็กทรอนิกส์เล็กที่สุดทำให้มีพื้นที่ผิว

มากที่สุด เมื่อผสมกับอีพ็อกซีเรซินใหม่จึงเกิดการกระจายตัวและยึดเกาะได้ดีกว่าชิ้นงานทดสอบ E4 ถึง E9 ส่งผลให้ความต้านทานแรงดึงสูงกว่า

จากผลการทดสอบเปอร์เซ็นต์การยึดติดของอีพ็อกซีเรซิน (E0) อีพ็อกซีเรซินใหม่ผสม ไรโซเคลเรซิน (E1 ถึง E3) และอีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมผงวงจรีเล็กทรอนิกส์บด ขนาด 60-80 mesh (E4 ถึง E6) 80-160 mesh (E7 ถึง E9) และ 160-200 mesh (E10 ถึง E12) ในอัตราส่วนผสมร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก ดังแสดงในตารางที่ 4-8 พบว่า ชิ้นงานทดสอบ E1 ถึง E3 มีเปอร์เซ็นต์การยึดติดมากกว่าชิ้นงานทดสอบ E4 ถึง E12 อย่างเห็นได้ชัด เนื่องจาก ไรโซเคลเรซินมีลักษณะเป็นของเหลวเหนียวใกล้เคียงกับเรซินใหม่ การผสมอีพ็อกซีเรซินใหม่กับไรโซเคลเรซินจึงสามารถผสมรวมเป็นเนื้อเดียวกันได้ดีกว่าอีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมผงวงจรีเล็กทรอนิกส์บด ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การยึดติดมากกว่า

เมื่อพิจารณาชิ้นงานทดสอบอีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมไรโซเคลเรซิน (E1 ถึง E3) ดังแสดงในตารางที่ 4-8 พบว่า ชิ้นงานทดสอบ E1 มีเปอร์เซ็นต์การยึดติดต่ำสุดและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อปริมาณไรโซเคลเรซินเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก การไรโซเคลอีพ็อกซีเรซินในผงวงจรีเล็กทรอนิกส์ด้วยตัวทำละลาย อุณหภูมิ และความดัน ทำให้โมเลกุลของไรโซเคลเรซินเกิดการเสื่อมสภาพ น้ำหนักโมเลกุลลดลงและการกระจายน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้เกิดการเกี่ยวพันของสายโซ่โมเลกุลเพิ่มขึ้น เมื่อผสมไรโซเคลเรซินในปริมาณมากขึ้น ทำให้เปอร์เซ็นต์การยึดติดเพิ่มมากขึ้น

เมื่อพิจารณาชิ้นงานทดสอบอีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมผงวงจรีเล็กทรอนิกส์บด ขนาด 60-80 mesh (E4 ถึง E6) 80-160 mesh (E7 ถึง E9) และ 160-200 mesh (E10 ถึง E12) ดังแสดงในตารางที่ 4-8 พบว่า ชิ้นงานทดสอบ E4 E7 และ E10 มีเปอร์เซ็นต์การยึดติดต่ำสุดและชิ้นงานทดสอบ E10 ถึง E12 มีเปอร์เซ็นต์การยึดติดสูงกว่าชิ้นงานทดสอบ E4 ถึง E9 เนื่องจาก พลังงานพื้นผิวระหว่างอีพ็อกซีเรซินใหม่กับเส้นใยแก้วในผงวงจรีเล็กทรอนิกส์บดมีพลังงานต่ำ ดังนั้นการผสมอีพ็อกซีเรซินใหม่กับผงวงจรีเล็กทรอนิกส์บดปริมาณน้อยและผงวงจรีเล็กทรอนิกส์บดขนาด 160-200 mesh มีพื้นที่ผิวมากที่สุด ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การยึดติดสูงกว่า

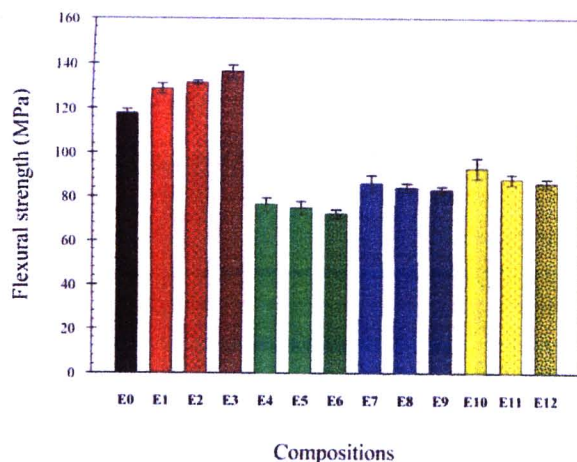


ภาพที่ 4-6 มอดูลัสยืดดึงของชิ้นงานทดสอบอีพ็อกซีเรซิน อีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมรีไซเคิลเรซิน และอีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมผงวงจรีเล็กทรอนิกส์บด ขนาด 60-80 mesh 80-160 mesh และ 160-200 mesh ในอัตราส่วนผสมร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก

จากผลการทดสอบมอดูลัสยืดดึงของอีพ็อกซีเรซิน (E0) อีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมรีไซเคิลเรซิน (E1 ถึง E3) และอีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมผงวงจรีอิเล็กทรอนิกส์บด ขนาด 60-80 mesh (E4 ถึง E6) 80-160 mesh (E7 ถึง E9) และ 160-200 mesh (E10 ถึง E12) ในอัตราส่วนผสมร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก ดังแสดงในภาพที่ 4-6 พบว่า ผลการทดลองเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับสมบัติความต้านทานแรงดึงและสมบัติความต้านทานแรงกระแทก กล่าวคือ ชิ้นงานทดสอบ E1 ถึง E3 มีมอดูลัสยืดดึงสูงกว่าชิ้นงานทดสอบ E4 ถึง E12 และชิ้นงานทดสอบ E1 มีมอดูลัสยืดดึงสูงสุด และมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณรีไซเคิลเรซินเพิ่มขึ้น ชิ้นงานทดสอบ E4 E7 และ E10 มีมอดูลัสยืดดึงสูงสุดและชิ้นงานทดสอบ E10 ถึง E12 มีมอดูลัสยืดดึงสูงกว่าชิ้นงานทดสอบ E4 ถึง E9

4.6.4 การทดสอบความต้านทานแรงค้ำงอและมอดูลัสค้ำงอ

การทดสอบความต้านทานแรงค้ำงอและมอดูลัสค้ำงอของอีพ็อกซีเรซินใหม่ (E0) อีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมรีไซเคิลเรซิน (E1 ถึง E3) และอีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมกับผงวงจรีอิเล็กทรอนิกส์บด ขนาด 60-80 mesh (E4 ถึง E6) 80-160 mesh (E7 ถึง E9) และ 160-200 mesh (E10 ถึง E12) ในอัตราส่วนผสมร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 790 ผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 4-7 และภาพที่ 4-8



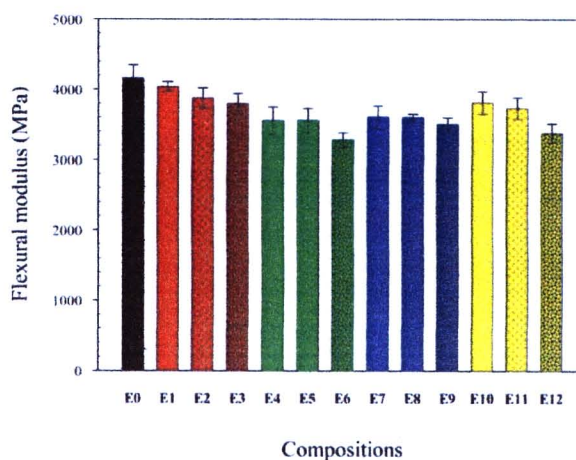
ภาพที่ 4-7 ความต้านทานแรงดัดงอของชิ้นงานทดสอบอีพ็อกซีเรซิน อีพ็อกซีเรซินใหม่ผสม ไรโซเคลเรซินและอีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมผงวงจรีเล็กทรอนิกส์บด ขนาด 60-80 mesh 80-160 mesh และ 160-200 mesh ในอัตราส่วนผสมร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก

จากผลการทดสอบความต้านทานแรงดัดงอของอีพ็อกซีเรซิน (E0) อีพ็อกซีเรซินใหม่ผสม ไรโซเคลเรซิน (E1 ถึง E3) และอีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมผงวงจรีเล็กทรอนิกส์บด ขนาด 60-80 mesh (E4 ถึง E6) 80-160 mesh (E7 ถึง E9) และ 160-200 mesh (E10 ถึง E12) ในอัตราส่วนผสมร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก ดังแสดงในภาพที่ 4-7 พบว่า ชิ้นงานทดสอบ E1 ถึง E3 สามารถต้านทานแรงดัดงอได้มากกว่าชิ้นงานทดสอบ E4 ถึง E12 เนื่องจาก ไรโซเคลเรซินมีลักษณะเป็นของเหลวหนืดใกล้เคียงกับเรซินใหม่แต่ผงวงจรีเล็กทรอนิกส์มีลักษณะเป็นของแข็งและอีพ็อกซีเรซินใหม่ผสม ไรโซเคลเรซินมีพลังงานพื้นผิวระหว่างอีพ็อกซีเรซินใหม่กับ ไรโซเคลเรซินมากกว่าอีพ็อกซีเรซินใหม่กับเส้นใยแก้วที่เป็นส่วนประกอบของผงวงจรีเล็กทรอนิกส์บด ดังนั้นอีพ็อกซีเรซินใหม่ผสม ไรโซเคลเรซินจึงสามารถผสมรวมเป็นเนื้อเดียวกันกับอีพ็อกซีเรซินใหม่ได้ดีกว่าผงวงจรีเล็กทรอนิกส์บด ส่งผลให้ความต้านทานแรงดัดงอได้มากกว่า

เมื่อพิจารณาชิ้นงานทดสอบอีพ็อกซีเรซินใหม่ผสม ไรโซเคลเรซิน (E1 ถึง E3) ดังแสดงในภาพที่ 4-7 พบว่า ชิ้นงานทดสอบ E1 สามารถต้านทานแรงดัดงอได้สูงสุดและมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณ ไรโซเคลเรซินเพิ่มขึ้น เนื่องจาก การ ไรโซเคลอีพ็อกซีเรซินในผงวงจรีเล็กทรอนิกส์ด้วยตัวทำละลาย อุณหภูมิ และความดัน ทำให้โมเลกุลของ ไรโซเคลเรซินเกิดการเสื่อมสภาพ

น้ำหนักโมเลกุลลดลงและการกระจายน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้น เมื่อผสมรีไซเคิลเรซินในปริมาณมากขึ้น ส่งผลให้ความต้านทานแรงดึงลดลง ซึ่งเป็นเหตุผลเดียวกับการทดสอบแรงกระแทก

เมื่อพิจารณาชิ้นงานทดสอบอีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมผงวงจรีเล็กทรอนิกส์ขนาด 60-80 mesh (E4 ถึง E6) 80-160 mesh (E7 ถึง E9) และ 160-200 mesh (E10 ถึง E12) ดังแสดงในภาพที่ 4-7 พบว่า ชิ้นงานทดสอบ E4 E7 และ E10 มีความต้านทานแรงดึงสูงสุดและชิ้นงานทดสอบ E10 ถึง E12 มีความต้านทานแรงดึงดิ่งมากกว่าชิ้นงานทดสอบ E4 ถึง E9 เนื่องจาก ชิ้นงานทดสอบ E4 E7 และ E10 มีปริมาณผงวงจรีอิเล็กทรอนิกส์น้อยที่สุดและชิ้นงานทดสอบ E10 ถึง E12 มีขนาดอนุภาคของอีพ็อกซีเรซินในผงวงจรีอิเล็กทรอนิกส์เล็กที่สุดทำให้มีพื้นที่ผิวมากที่สุด เมื่อผสมกับอีพ็อกซีเรซินใหม่จึงเกิดการกระจายตัวและยึดเกาะได้ดีกว่าชิ้นงานทดสอบ E4 ถึง E9 ส่งผลให้ความต้านทานแรงดึงสูงกว่า



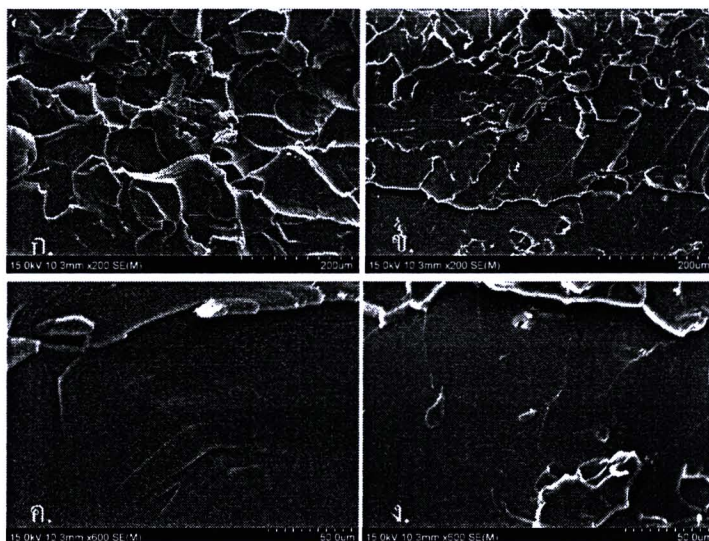
ภาพที่ 4-8 มอดูลัสดัดของชิ้นงานทดสอบอีพ็อกซีเรซิน อีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมรีไซเคิลเรซิน และอีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมผงวงจรีอิเล็กทรอนิกส์ขนาด 60-80 mesh 80-160 mesh และ 160-200 mesh ในอัตราส่วนผสมร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก

จากผลการทดสอบมอดูลัสดัดของอีพ็อกซีเรซิน (E0) อีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมรีไซเคิลเรซิน (E1 ถึง E3) และอีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมผงวงจรีอิเล็กทรอนิกส์ขนาด 60-80 mesh (E4 ถึง E6) 80-160 mesh (E7 ถึง E9) และ 160-200 mesh (E10 ถึง E12) ในอัตราส่วนผสมร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก ดังแสดงในภาพที่ 4-8 พบว่า ผลการทดลองเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับ

สมบัติความต้านทานแรงดึง สมบัติความต้านทานแรงกระแทกและสมบัติโมดูลัสยืดดึง กล่าวคือ ชิ้นงานทดสอบ E1 ถึง E3 มีโมดูลัสยืดดึงสูงกว่าชิ้นงานทดสอบ E4 ถึง E12 และชิ้นงานทดสอบ E1 มีโมดูลัสยืดดึงสูงสุดและมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณรีไซเคิลเรซินเพิ่มขึ้น ชิ้นงานทดสอบ E4 E7 และ E10 มีโมดูลัสยืดดึงสูงสุดและชิ้นงานทดสอบ E10 ถึง E12 มีโมดูลัสยืดดึงสูงกว่าชิ้นงานทดสอบ E4 ถึง E9

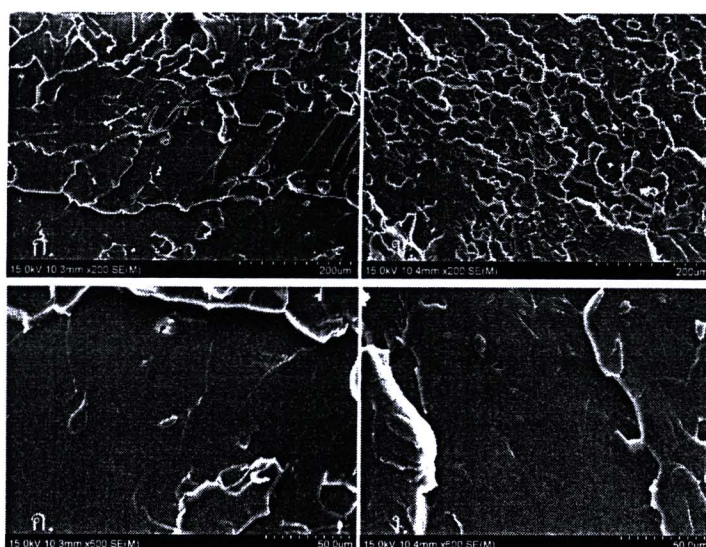
4.7 ลักษณะฐานวิทยา

หลังจากที่ทำการทดสอบสมบัติเชิงกลแล้ว สามารถยืนยันผลการทดลองด้วยภาพถ่ายฐานวิทยาของชิ้นงานทดสอบจากการรีไซเคิลทางเคมี คือ อีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมกับรีไซเคิลเรซินจากการรีไซเคิลด้วยเทคนิคถึงความดันและชิ้นงานทดสอบจากการรีไซเคิลทางกล คือ อีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมกับแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์บด ขนาด 60-80 mesh 80-160 mesh และ 160-200 mesh ในอัตราส่วนผสมร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก ผลการทดสอบดังแสดงในภาพที่ 4-9 ถึง 4-11



ภาพที่ 4-9 ลักษณะฐานวิทยาของชิ้นงานทดสอบจากกึ่งวงจรทรานซิสเตอร์แบบ
 ส่องกราด ก.อีพ็อกซีเรซินใหม่ กำลังขยาย 200 เท่า ข. อีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมรีไซเคิล
 เรซิน อัตราส่วนผสมร้อยละ 10 กำลังขยาย 200 เท่า ค. อีพ็อกซีเรซินใหม่ กำลังขยาย
 600 เท่า ง. อีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมรีไซเคิลเรซิน อัตราส่วนผสมร้อยละ 10 กำลังขยาย
 600 เท่า

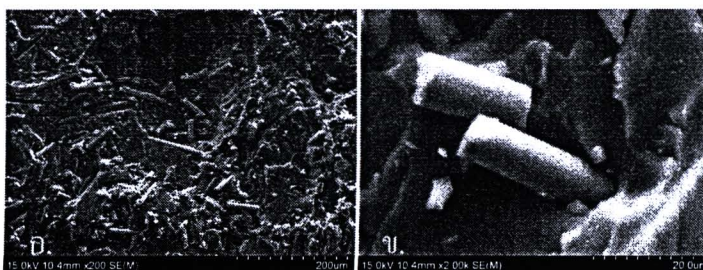
จากผลการทดสอบลักษณะสัณฐานวิทยาของชิ้นงานทดสอบจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 200 เท่า ของชิ้นงานทดสอบ E0 และ E1 ดังแสดงในภาพที่ 4-9 พบว่า ชิ้นงานทดสอบ E1 มีลักษณะของรอยแตกแบบ Quasi-cleavage fracture เหมือนกับชิ้นงานทดสอบ E0 เมื่อพิจารณาที่ชิ้นงานทดสอบ E0 และ E1 กำลังขยาย 600 เท่า พบว่า ชิ้นงานทดสอบ E1 สามารถผสมรวมเป็นเนื้อเดียวกันได้ดี สอดคล้องกับผลการทดลองการทดสอบสมบัติเชิงกลของ อีพ็อกซีเรซินใหม่และอีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมรีไซเคิลเรซิน ที่มีสมบัติความแข็ง ความต้านทานแรงกระแทก ความต้านทานแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืดดึงและมอดูลัส ต่างกันเพียงเล็กน้อย



ภาพที่ 4-10 ลักษณะสัณฐานวิทยาของชิ้นงานทดสอบจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ก.อีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมรีไซเคิลเรซิน อัตราส่วนผสมร้อยละ 10 กำลังขยาย 200 เท่า ข. อีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมรีไซเคิลเรซิน อัตราส่วนผสมร้อยละ 30 กำลังขยาย 200 เท่า ค. อีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมรีไซเคิลเรซิน อัตราส่วนผสมร้อยละ 10 กำลังขยาย 600 เท่า ง. อีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมรีไซเคิลเรซิน อัตราส่วนผสมร้อยละ 30 กำลังขยาย 600 เท่า

จากผลการทดสอบลักษณะสัณฐานวิทยาของชิ้นงานทดสอบจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 200 เท่า ของชิ้นงานทดสอบ E1 และ E3 ดังแสดงในภาพที่ 4-10 พบว่า ชิ้นงานทดสอบ E1 และ E3 มีลักษณะของรอยแตกแบบ Quasi-cleavage fracture เหมือนกัน

ชิ้นงานทดสอบ E3 มีลักษณะ Ductile dimples มากกว่าชิ้นงานทดสอบชิ้นงานทดสอบ E1 และที่กำลังขยาย 600 เท่า พบว่า ชิ้นงานทดสอบ E1 และ E3 สามารถผสมรวมเป็นเนื้อเดียวกันได้ดี สอดคล้องกับผลการทดลองการทดสอบสมบัติเชิงกลของอีพ็อกซีเรซินใหม่และอีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมรีไซเคิลเรซิน ที่มีสมบัติความแข็งแรง ความต้านทานแรงกระแทก ความต้านทานแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยึดติดและมอดูลัส ต่างกันเพียงเล็กน้อย



ภาพที่ 4-11 ลักษณะพื้นฐานวิทยาของชิ้นงานทดสอบจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ก.อีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมผงวงจรีเล็กทรอนิกส์บัด ขนาด 160-200 mesh อัตราส่วนผสมร้อยละ 10 กำลังขยาย 200 เท่า ข. อีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมผงวงจรีเล็กทรอนิกส์บัด ขนาด 160-200 mesh อัตราส่วนผสมร้อยละ 10 กำลังขยาย 2000 เท่า

จากผลการทดสอบลักษณะพื้นฐานวิทยาของชิ้นงานทดสอบจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 200 เท่า ของชิ้นงานทดสอบ E10 ดังแสดงในภาพที่ 4-11 พบว่าอีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมผงวงจรีเล็กทรอนิกส์บัด ขนาด 160-200 mesh อัตราส่วนผสม ร้อยละ 10 ไม่สามารถผสมรวมเป็นเนื้อเดียวกันได้และเส้นใยเกิดหลุดออกจากอีพ็อกซีเรซินใหม่ (Fiber pull out) ที่กำลังขยาย 2000 เท่า พื้นผิวของเส้นใยแก้วกับอีพ็อกซีเรซินใหม่ไม่สามารถยึดเกาะกันได้และเกิดช่องว่าง (Void) บริเวณรอบเส้นใยแก้ว แสดงว่า พลังงานพื้นผิวระหว่างอีพ็อกซีเรซินใหม่กับเส้นใยแก้วที่เป็นส่วนประกอบของผงวงจรีเล็กทรอนิกส์บัดมีพลังงานต่ำ สอดคล้องกับผลการทดลองการทดสอบสมบัติเชิงกล

4.8 สมบัติทางความร้อนของชิ้นงานทดสอบ

การทดสอบสมบัติเชิงทางความร้อนของชิ้นงานทดสอบจากการรีไซเคิลทางเคมี คือ อีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมกับรีไซเคิลเรซินจากการรีไซเคิลด้วยเทคนิคถึงความดัน เพื่อเปรียบเทียบ อุณหภูมิคล้ายแก้วและอุณหภูมิการสลายตัวด้วยเทคนิคดีเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรีและ เทคนิคเทอร์โมกราวิเมทริกแอนาไลซิส

4.8.1 การทดสอบอุณหภูมิคล้ายแก้ว

การทดสอบอุณหภูมิคล้ายแก้วของอีพ็อกซีเรซิน อีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมรีไซเคิลเรซิน ในอัตราส่วนผสมร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4-9

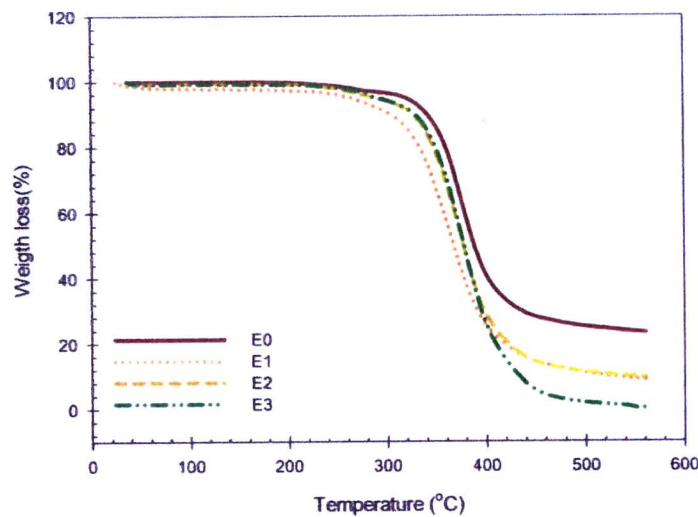
ตารางที่ 4-9 อุณหภูมิคล้ายแก้วของชิ้นงานทดสอบอีพ็อกซีเรซินและอีพ็อกซีเรซินใหม่ผสม รีไซเคิลเรซิน ในอัตราส่วนผสมร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก

ชิ้นงานทดสอบ	อุณหภูมิคล้ายแก้ว (องศาเซลเซียส)
E0	82.81 ± 1.57
E1	79.90 ± 0.60
E2	68.15 ± 0.92
E3	65.03 ± 0.95

จากผลการทดสอบอุณหภูมิคล้ายแก้วของอีพ็อกซีเรซินและอีพ็อกซีเรซินใหม่ผสม รีไซเคิลเรซิน ในอัตราส่วนผสมร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก ดังแสดงในตารางที่ 4-9 พบว่า ชิ้นงานทดสอบ E1 มีอุณหภูมิคล้ายแก้วสูงสุด คือ 79.90 องศาเซลเซียส และมีแนวโน้มลดลงตาม ปริมาณของรีไซเคิลเรซิน เนื่องจาก การรีไซเคิลอีพ็อกซีเรซินในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วย ตัวทำละลาย อุณหภูมิ และความดัน ทำให้โมเลกุลของรีไซเคิลเรซินเกิดการเสื่อมสภาพ น้ำหนักโมเลกุลลดลงและการกระจายน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้น เมื่อผสมรีไซเคิลเรซินในปริมาณ มากขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิคล้ายแก้วลดลง

4.8.2 การทดสอบอุณหภูมิการสลายตัว

การทดสอบอุณหภูมิการสลายตัวของอีพ็อกซีเรซิน อีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมรีไซเคิลเรซิน ในอัตราส่วนผสมร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก ผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 4-10



ภาพที่ 4-12 อุณหภูมิการสลายตัวของชิ้นงานทดสอบอีพ็อกซีเรซินและอีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมรีไซเคิลเรซิน ในอัตราส่วนผสมร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก

จากผลการทดสอบอุณหภูมิการสลายตัวของอีพ็อกซีเรซินและอีพ็อกซีเรซินใหม่ผสมรีไซเคิลเรซิน ในอัตราส่วนผสมร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก ดังแสดงในภาพที่ 4-10 พบว่าชิ้นงานทดสอบ E1 ถึง E3 มีอุณหภูมิการสลายตัวใกล้เคียงกัน คือ 270-360 องศาเซลเซียส ในขณะที่ชิ้นงานทดสอบ E3 สามารถสลายตัวได้มากที่สุดและมีแนวโน้มของการสลายตัวลดลงตามปริมาณของรีไซเคิลเรซิน เนื่องจาก การรีไซเคิลอีพ็อกซีเรซินในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยตัวทำละลายอุณหภูมิ และความดัน ทำให้โมเลกุลของรีไซเคิลเรซินเกิดการเสื่อมสภาพ น้ำหนักโมเลกุลลดลง และการกระจายน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้น เมื่อผสมรีไซเคิลเรซินในปริมาณมากขึ้น ส่งผลให้การสลายตัวเกิดได้เพิ่มมากขึ้น